通水性のある円柱に作用する流体力の特性*

渡部 英夫^{*1}, 庵原 昭夫^{*1}, 橋本 弘之^{*1}Hydraulic Characteristics of a Circular Cylinder
with a Permeable Wall

Hideo WATANABE, Akio IHARA and Hiroyuki HASHIMOTO

Experiments were performed with two circular cylinders whose walls were porous and permeable in order to investigate the effects of flow of water through the wall. Each cylinder was made of bronze sintered compact, available as a sintered metallic filter. It had an outside diameter of 30 mm, wall thickness of 2 mm and nominal filter size of 2 μm and 20 μm , respectively. Force coefficients and pressure distributions of the test cylinders were measured over the Reynolds number $1.1 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^5$ and were compared with those of the same porous cylinders into which another circular cylinder, an "inner cylinder" with a solid wall, was inserted to obstruct such a through-flow. The measured results showed that the drag coefficients and the root-mean-square values of the fluctuating lift coefficients of the test cylinder equipped with the inner cylinder were smaller than those with the through-flow. This was caused by the increase in the effective surface roughness and the altered pressure distribution because of the permeability of the cylinder wall. The increase in the drag coefficient was accompanied by the decrease in the Strouhal number of the fluctuating lift, and vice versa.

Key Words: External Flow, Fluid Force, Pressure Distribution, Circular Cylinder, Permeability, Surface Roughness, Transition, Strouhal Number

1. 緒 言

円柱周りの流れは、流体機械や水理構造物にしばしば見られる鈍頭物体周りの流れを理解する基礎となるので、従来数多くの研究が積み重ねられており、現在もなお多くの研究がなされている^{例え(1)(2)}。著者らもさきに水流中に置かれた円柱の表面から微細な気泡を吹き出し、それに作用する流体力の特性を実験的に解明した⁽³⁾。その際に用いた供試円柱は、球形のブロンズ粉末粒子を円筒型に焼結したもので、円柱壁はポーラスで通水性を有している。この円柱壁が有する通水性のために、気泡を吹き出さない完全に濡れた状態におけるその周りの流れは、通水性のない壁面を持つ円柱周りの流れとは異なっている、すなわち、円柱周りの圧力分布によって円柱外部から内部へ(またはその逆に)円柱壁を通り抜けて流入・流出する流れが誘起されていると考えられる兆候を示した。例えば、同程度の

相対粗さを持つ通水性のない円柱に比べて大きな抗力と変動揚力が計測された。よって本研究においては、円柱壁を通り抜ける流れを円柱内部に通水性のない円筒を挿入して阻止した場合と、それを取り除いた場合とを比較することによって、円柱壁の通水性が円柱の揚力、抗力、ストローハル数、圧力分布などに及ぼす影響を明かにすることを試みた。

主な記号

 C_D : 抗力係数 $= 2D/(\rho U_\infty^2 dl)$ C_L : 揚力係数 $= 2L/(\rho U_\infty^2 dl)$ C_p : 圧力係数 $= 2(p_\theta - p_\infty)/(\rho U_\infty^2)$ d : 供試円柱の直径 (m) D, L : 抗力, 揚力 (N) f : 周波数 (1/s) H : 流路高さ (m) d_r : ブロンズ焼結体のブロンズ粒子径 (m) k_s : Nikuradse の砂粒粗さの高さ (m) ℓ : 供試円柱の流路幅方向の長さ (m) p : 圧力 (Pa) Re : レイノルズ数 $= U_\infty d / \nu$

* 平成5年8月21日 流体工学部門講演会において講演, 原稿受付 平成5年10月13日.

^{*1} 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980-77 仙台市青葉区片平2-1-1).

表1 実験装置の主要寸法と実験条件

Water tunnel	Closed-loop type	
Test section	Height (H) 305mm, Width 100mm	
Free-stream velocity	5 ~ 15m/s	
Turbulence intensity	About 0.1% at 10m/s	
Pressure	Free from cavitation occurrence	
Water temperature	286 ~ 302K	
Reynolds number (Re)	$1.1 \sim 4.4 \times 10^5$	
Test cylinder	Outside diameter (d)	30mm
	Length (l)	100mm
	Aspect Ratio (l/d)	3.3
	Tunnel blockage ratio (d/H)	9.8%

表2 ポーラス円柱の諸元

Name	2 μ m porous cylinder	20 μ m porous cylinder
Nominal filter size	2 μ m	20 μ m
Diameter of bronze particle (d_p)	$50 \pm 3\mu$ m	$200 \pm 20\mu$ m
Permeability	$0.5 \times 10^{-7}\text{cm}^2$	$2.0 \times 10^{-7}\text{cm}^2$
d_p/d	170×10^{-5}	670×10^{-5}
$0.55(d_p/d)^{[6]}$	90×10^{-5}	370×10^{-5}

St : ストローハル数 $= fd/U_\infty$

U_∞ : 一様流の速度 (m/s)

ν : 水の動粘性係数 (m^2/s)

ρ : 水の密度 (kg/m^3)

θ : 円柱の前方岐点から測った周方向角度 (度)

添 字

mean: 時間平均値

rms: 時間変動成分の二乗平均値

θ : 角度 θ における値

'(prime): 変動成分

∞ : 一様流中における値

2. 実験装置および方法

実験には東北大学流体科学研究所の大形高速回流実験室に設置されている密閉型回流水槽を用いた。詳細は文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾に譲り、表1に回流水槽と供試円柱の主要寸法と主な実験条件を示した。

供試円柱は、Ihara et al.⁽³⁾が円柱の流力特性に及ぼす微細気泡の表面吹き出しの影響について実験を行った際に用いたものと同一で、通水性のある円筒壁 (厚さ 2mm) を持つ2本の供試円柱は、それぞれ公称ろ過精度 2 μ m と 20 μ m の焼結ブロンズ製円筒型フィルタエレメントを利用して製作したものである。これより後、各円柱をその素材の公称ろ過精度に因んで“2 μ m ポーラス円柱”および“20 μ m ポーラス円柱”と呼ぶことにする。

図1 揚・抗力計測用ポーラス円柱および力センサ

図2 圧力分布計測用ポーラス円柱

各ポーラス円柱の諸元を表2に示す。通水性は、メーカーのカatalogデータから算出した。その値は、比較的細かい砂地の通水性の範囲⁽⁷⁾にある。また、比較のために、通水性のない表面が滑らかな (中心線平均粗さ 0.2 μ m) 黄銅製“滑面円柱”を用いた実験も行った。

各円柱に作用する流体力は、図1に示すひずみゲージ式の揚・抗力測定用バランスを用いて測定した。図はポーラス円柱を取り付けた状態のもので、円柱中心には補強用の支柱が通っている。センサ部はステンレス鋼製である。ひずみゲージの防水のため、ゲージおよびそれとリード線との接続部をエポキシ樹脂系接着剤で薄くコーティングした後、シリコンゴムでリード線も含めて広く覆った。

ポーラス円柱内部には、図1に示すように円柱内径

図3 抗力係数 C_{Dmean} のレイノルズ数 Re による変化
(既存データとの比較)

表3 実験条件の比較

Author(s)	Fluid	Aspect ratio	Blockage ratio(%)	Blockage correction ⁽⁸⁾	Turbulence intensity(%)	Method
Achenbach and Heinecke ⁽⁹⁾	Air	3.38	16.4	Not done	0.45	C_p
Schewe ⁽¹⁰⁾	Air	10.0	10.0	Not done	less than 0.4	Balance
Güven et al. ⁽¹¹⁾	Air	3.08	17.8	Done	0.2	C_p
Adachi et al. ⁽¹²⁾	Air	10.0	10.0	Done	0.37(max.)	C_p
Ihara ⁽¹³⁾	Water	2.5	15.4	Not done	0.72	Balance
Oba & Yasu ⁽¹⁴⁾	Water	3.3, 1.7	5.0, 10.0	Done		C_p
Present	Water	3.3	9.8	Not done	0.1	Balance

にその外径が等しい黄銅製の円筒(厚さ2mm)を挿入して、ポーラス円柱壁を通り抜ける流れを阻止した。通り抜け流れを許した実験を行う場合にはこの円筒(以後、“内筒”と呼ぶことにする)を取り除いた。

図2には圧力分布計測用のポーラス円柱を示す。長手方向中央には直径0.5mmの測圧孔1個が設けられている。測圧孔は、図の下方に示すように、ポーラス壁内側に圧力伝送用の銅管を埋め込み、ポーラス壁とその銅管壁を貫通する穴をドリルで開けることによって設けた。円柱は支柱を軸として自由に回転させることができ、それによって円柱の全周にわたって表面圧力分布を測定することができる。このような構造では、ポーラス壁内の通水性のために、測圧孔を介して計測される圧力にはその周辺の圧力分布の影響が含まれ、したがって計測される圧力分布は、流体力を計測した場合のそれとは若干異なっていると考えられるが、測定結果の考察によると、その影響は定性的な議論には十分に耐え得る程度のわずかなものであった。

3. 結果と考察

3・1 抗力係数

3・1・1 既存結果との比較 本実験における計測結果の妥当性を調べるために、滑面円柱の抗力係数のレイノルズ数による変化を、他の研究者の計測結果と対比して図3に示す。また、表3には引用データの実験条件の主なものを示す。

よく知られているように、円柱の流力特性は実験条件によって異なる。図においても亜臨界領域(流れ領域の分類はAchenbach⁽⁶⁾および安達ら⁽¹⁵⁾に従う)を除き、臨界レイノルズ数および抗力係数の値が研究者によって違っている。しかしそれと流路閉塞効果の補正の有無、アスペクト比、抗力の計測方法(表面圧力を積分する方法、バランスを用いて直接計測する方法)などとの間に相関は認められないようである。また、本実験では、バランスによる計測値(○印)と C_p より求めた値(●印)との大小関係が、臨界レイノルズ数の前後で逆転している。その理由に関し、 C_p より求めるのは圧力抵抗のみであること、 C_p を流路中央でしか計測していないこと、どちらの値についても流路閉塞効果を補正していないこと、などを考慮して実験データを検討したが、その理由を明かにすることはできなかった。一方、本実験を除き一様中の乱れ度が小さいほど、臨界レイノルズ数が大きくなっている。本実験における臨界レイノルズ数は、乱れ度が約0.1%と小さいにもかかわらず、乱れ度が0.37%の安達ら⁽¹²⁾や0.45%のAchenbach and Heinecke⁽⁹⁾のものより若干小さくなっている。これには作動流体、円柱端の隙間の大きさ、円柱の支持方法など、表に掲げた以外の実験条件の違いが影響していると考えられる。したがって、既存データとの厳密な比較は不可能であるが、本実験においても亜臨界領域から超臨界領域にかけての円柱の典型的な流力特性が得られており、また臨界点から超臨界領域の初期における抗力係数の値は他の実験結果の中間にあって、本実験における計測結果はおおむね妥当であると考えられる。

3・1・2 通水性の影響 図4に内筒の有無によるレイノルズ数(Re) - 抗力係数(C_{Dmean}) 曲線の変化を滑面円柱のそれと比較して示す。

Achenbach⁽⁶⁾や安達ら⁽¹⁵⁾は、円柱周りの流れに及ぼす表面粗さの影響を実験的に調べ、表面粗さが増大すると臨界レイノルズ数が減少し、その点における抗力係数が増大するとともに、超臨界から極超臨界領域における抗力係数が増大することを明らかにしている。両ポーラス円柱の表面はブロンズ粒子を寄せ集めた粗面となっているため、上述の粗面円柱の場合と同じく滑面円柱に比べて境界層の発達が早く、先に触れたAchenbach⁽⁶⁾の流れ領域の分類に従えば、内筒の

図4 時間平均抗力係数 C_{Dmean} のレイノルズ数 Re による変化に及ぼす内筒の影響

有無にかかわらず $20\mu\text{m}$ ポーラス円柱の特性は極超臨界領域にあり、 $2\mu\text{m}$ ポーラス円柱のそれは遷移領域から極超臨界領域の初期にある。図4中の実線はその Achenbach⁽⁶⁾ の実験結果で、表面粗さによる抗力係数の変化を示したものである。 k_s は等価砂粒粗さ (Nikuradse's sand-grain roughness)、 d は円柱直径である。他にも粗面円柱の抗力係数を実測した例は多い⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ が、等価砂粒粗さを彼のように検定によって求めたものは知見せず、彼の実験結果との比較において各々の実験結果に考察を加えているので、ここでもそれに倣うことにする。

Achenbach⁽⁶⁾ によれば、直径 d_r の球形の粗さ要素を円柱表面に貼付した場合の等価砂粒粗さ k_s は、 d_r ではなく $0.55d_r$ に相当する。一方、Schlichting⁽¹⁷⁾ の矩形ダクトでの実験によれば、 $k_s = 0.627d_r$ となる。表2には $k_s = d_r$ とした場合と Achenbach の提唱する k_s を用いた場合の両方の相対粗さ (k_s/d) を算出しておいた。

前節に述べたように厳密な比較はできないが、図4において内筒を挿入している両ポーラス円柱の極超臨界領域での抗力係数の値を Achenbach のものと対比すると、それらは $k_s = d_r$ ではなく、 $k_s = 0.55d_r$ あるいは $k_s = 0.627d_r$ である相対粗さを持つ粗面円柱のそれに近いと考えられる。

内筒を除去してポーラス壁を通り抜ける流れを許すと、極超臨界領域にある $20\mu\text{m}$ ポーラス円柱の場合、抗力係数が約40%増大する。同様に、 $2\mu\text{m}$ ポーラス円柱の超臨界領域の終期から極超臨界領域の初期における抗力係数も、内筒を除去することによって同程度増大する。その場合の相対粗さは、表2および図4から $k_s = d_r$ として算出したものの方が妥当である。したがってこの流れ領域では、円柱壁に通水性が生ずると実

図5 ストローハル数 St のレイノルズ数 Re による変化に及ぼす内筒の影響

図6 相対粗さ k_s/d によるストローハル数 St および抗力係数 C_{Dmean} の変化

質的な表面粗さが増大すると考えられる。

一方、後述する圧力分布の計測結果からは、内筒の除去による抗力係数の増大は、はく離点の前進に伴う後流幅の拡大によるもの見方も可能である。すなわち、通り抜け流れがある場合には、それによって円柱表面の回り込み流れが阻止されるために後流幅が増大し、抗力係数の増大が引き起こされると考えられる。このような流れの様相は、久保ら⁽¹⁸⁾ の流入・流出スリットを有する円筒内の流れを水素気泡法によって可視化した結果にも現われているように見受けられる。

しかしながら、 $2\mu\text{m}$ ポーラス円柱の遷移領域から超臨界領域の初期の領域では、内筒を除去しても抗力係数および臨界レイノルズ数はほとんど変化しない。

3・2 ストローハル数 図5には変動揚力のスペクトルピークから算出したストローハル数 St のレイノルズ数 Re による変化を示す。抗力係数とは逆に、内筒を除去すると超臨界領域から極超臨界領域における St の値が若干減少している。

安達ら⁽¹⁵⁾ は、極超臨界領域におけるストローハル数 St が粗さのみによって決まる一定値を取り、表面粗さが大きいほど St が小さくなることを見出している。また、Achenbach and Heinecke⁽⁹⁾ は、計測結果はデータの散らばりの範囲内にあるとして結論を保留しているが、安達ら⁽¹⁵⁾ と同様の傾向を示すデータを提出している。

図7 変動揚力係数のrms値 $C'_{L,rms}$ のレイノルズ数 Re による変化に及ぼす内筒の影響

したがって、本実験でのストローハル数の計測結果からも、抗力係数(図4)の場合と同じく、内筒を除去すると超臨界領域から極超臨界領域における実質的な表面粗さが増大するものと考えられる。

一方、抗力係数とストローハル数との間には、抗力係数が増大すればストローハル数が減少し、抗力係数が減少すればストローハル数が増大するという相関のあることが知られている⁽¹⁹⁾。このことを検証するため、図6に超臨界領域の終期から極超臨界領域における抗力係数とストローハル数の逆数($1/S_s$)の、相対粗さ(k_s/d)による変化を示す。相対粗さは3・1・2節に述べた考察に基づき、内筒を挿入した場合(縦の点線で示す)は $k_s = 0.55d_r$ として、内筒を除去した場合(縦の一点鎖線で示す)は $k_s = d_r$ として算出した。ストローハル数および抗力係数はレイノルズ数が 2.5×10^5 以上における平均値である。また、参考のために、滑面円柱($k_s/d = 0.0$)の場合として Roshko⁽¹⁹⁾および Schewe⁽¹⁰⁾の極超臨界領域における実験値を平均した値も記入してある。

図において $1/St$ 、 $C_{D,mean}$ 双方とも相対粗さ k_s/d の増大とともに単調に増大している。このことは3・1・2節に述べた k_s の見積りがほぼ妥当であって、それを用いて算出した k_s/d によって $1/St$ および $C_{D,mean}$ を整列させることができることを示している。そして、実験点を結んだ二本の曲線がほぼ平行を保って変化していて、前述した抗力係数とストローハル数との相関が相対粗さ k_s/d を変化させた場合にも存在することが認められる。

3・3 揚力変動と圧力分布 図7に揚力変動のrms値 $C'_{L,rms}$ のレイノルズ数による変化を示す。滑面円柱の遷移領域に見られる鋭いピークは、双安定な揚力の発

図8 圧力分布に及ぼす内筒の影響

生・消滅によるものである⁽²⁰⁾。抗力係数(図4)の場合と同様、内筒の除去によって超臨界領域の終期より大きなレイノルズ数の領域で、揚力の変動が大幅に増大している。

図8には内筒の除去によってすべての特性値が変化した極超臨界領域における圧力分布を示す。内筒を除去することによって最小圧力係数が上昇し、はく離点が約10°上流に移動し、背圧が下がっている。

これらの変化は、前述した(3・1・2節)のような抗力係数の変化に対応しており、内筒を除去することによって壁面に通水性が生じたために、円柱からの渦の流出に対応して円柱上下面の最小圧力点付近に円柱壁を通して流出入する流れが発生し、これがはく離点を上流側に移動させ、放出される渦の強さを増大させている⁽²¹⁾⁽²²⁾ことによって引き起こされたものと考えられる。

4. 結 論

一様な水流中に置かれたポーラスな円筒壁をもつ円柱の流力特性に及ぼす壁面の通水性の影響を明かにする目的で、焼結ブロンズ製の中空円柱を供試物体として実験を行い、次のような結論を得た。

(1) ポーラス円柱内部に通水性のない内筒を挿入して円柱壁を通り抜ける流れを阻止した場合に比べ、それを除去して通水性を付与した場合には、超臨界領域から極超臨界領域における抗力係数が増大する。また、揚力の変動も増大する。

(2) その原因は、(a) 内筒を除去することによって円柱表面の実質的な粗さが増大すること、(b) 円柱まわりの圧力分布が変化して最小圧力係数が上昇し、はく離点が上流に移動し、背圧が低下すること、(c) 壁面に生じ

た通水性のために、渦の流出に対応して最小圧力点付近に円柱壁を通して流出入する流れが発生し、これらは離点を上流側に移動させ、放出される渦の強さを増大させること、などであろうと推量される。

(3) 本実験の場合にも抗力係数が増大するとストローハル数が減少するという、滑面円柱の場合と同様の抗力係数とストローハル数との相関が認められた。

文 献

- (1) West, G. S. and Apelt, C. J., Measurements of Fluctuating Pressures and Forces on a Circular Cylinder in the Reynolds Number Range 10^4 to 2.5×10^5 , *J. Fluids and Structures*, **7**(1993), pp.227-244.
- (2) 福富純一郎・中瀬敬之・滝川三左男, テーパー円柱および段付円柱の後流渦, 機論(B), **59**-559(1993), pp.684-690.
- (3) Ihara, A., Watanabe, H., and Hashimoto, H., Hydraulic Forces Acting on a Circular Cylinder with Surface Source of Minute Air Bubbles and Its Citation Characteristics, *Trans. ASME, J. Fluids Engng.*, **115**-2(1993), pp. 275-282.
- (4) 村井等・庵原昭夫・菱沼信夫・濱谷剛, 増速翼列のキャビテーション性能に及ぼす流速の影響, 東北大学速研報告, **58**(1987), pp. 51-93.
- (5) 渡部英夫・庵原昭夫・橋本弘之, 前縁付近からの微細気泡吹出しを伴う円柱の流力特性, 機論(B), **59**-561(1993), pp. 1457-1464.
- (6) Achenbach, E., Influence of Surface Roughness on the Cross-flow Around a Circular Cylinder, *J. Fluid Mech.*, **46**-2(1971), pp. 321-335.
- (7) Streeter, V. L., *Handbook of Fluid Dynamics*, 1st ed., (1961), 16-8, McGraw-Hill.
- (8) Allen, H. J. and Vincenti, W. G., Wall Interference in a Two-Dimensional-Flow Wind Tunnel, With Consideration of the Effect of Compressibility, NACA Technical Report No. 782(1944).
- (9) Achenbach, E. and Heinecke, E., On Vortex Shedding From Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers 6×10^3 to 5×10^6 , *J. Fluid Mech.*, **109**(1981), pp. 239-251.
- (10) Schewe, G., On the Force Fluctuations Acting on a Circular Cylinder in Crossflow From Subcritical up to Transcritical Reynolds Numbers, *J. Fluid Mech.*, **133**(1983), pp. 265-285.
- (11) Güven O., Farell, C. and Patel, V. C., Surface-Roughness Effects on the Mean Flow Past Circular Cylinders, *J. Fluid Mech.*, **98**-4(1980), pp. 673-701.
- (12) 安達勤・松内一雄・松田諭・河合達雄, 高レイノルズ数における円柱まわりの流れと抵抗, 機論(B), **51**-461(1985), pp. 295-299.
- (13) 庵原昭夫, キャビテーションによる非定常流体力に及ぼす後退角の影響(第1報, 後退角を有する円柱キャビテーションの非定常流体力), 東北大学速研報告, **53**(1984), pp. 17-31.
- (14) 大場利三郎・安昭八, 円柱キャビテーションの動特性(特に2種の振動について), 機論(B), **46**-402(1980), pp. 197-205.
- (15) 安達勤・小野博基・松内一雄・河合達雄・長哲夫, 高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ(表面粗さの影響), 機論(B), **55**-511(1989), pp. 685-691.
- (16) Nakamura, Y. and Tomonari, Y., The Effects of Surface Roughness on the Flow Past Circular Cylinders at High Reynolds Numbers, *J. Fluid Mech.*, **123**(1982), pp. 363-378.
- (17) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th Edition, McGraw-Hill Book Company, 1979, p. 624.
- (18) 久保忠延・池田敏彦・土屋良明, 流入・流出スリットを有する円筒内の流れの可視化, 可視化情報, **13**-Suppl. 2(1993), pp. 43-46.
- (19) Roshko, A., Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Number, *J. Fluid Mech.*, **10**(1961), pp. 345-356.
- (20) Schewe, G., Sensitivity of Transition Phenomena to Small Perturbations in Flow Round a Circular Cylinder, *J. Fluid Mech.*, **172**(1986), pp. 33-46.
- (21) 五十嵐保, スリットのある円柱まわりの流れ特性(第1報, 流れの制御とフローパターン), 機論, **43**-372(1977), pp. 2974-2984.
- (22) 川田裕郎ほか(編著), 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1979, pp. 357-359.